Delta-modulatie

Met delta-modulatie kunt u op een heel eenvoudige manier een analoog signaal omzetten in een één bit brede digitale datastroom. Deze datastroom is al even eenvoudig weer om te zetten in het herwonnen analoog signaal. Het voordeel van de delta-modulator is dat u er, zonder ingewikkelde schakelingen te bouwen, zélf mee kunt experimenteren.

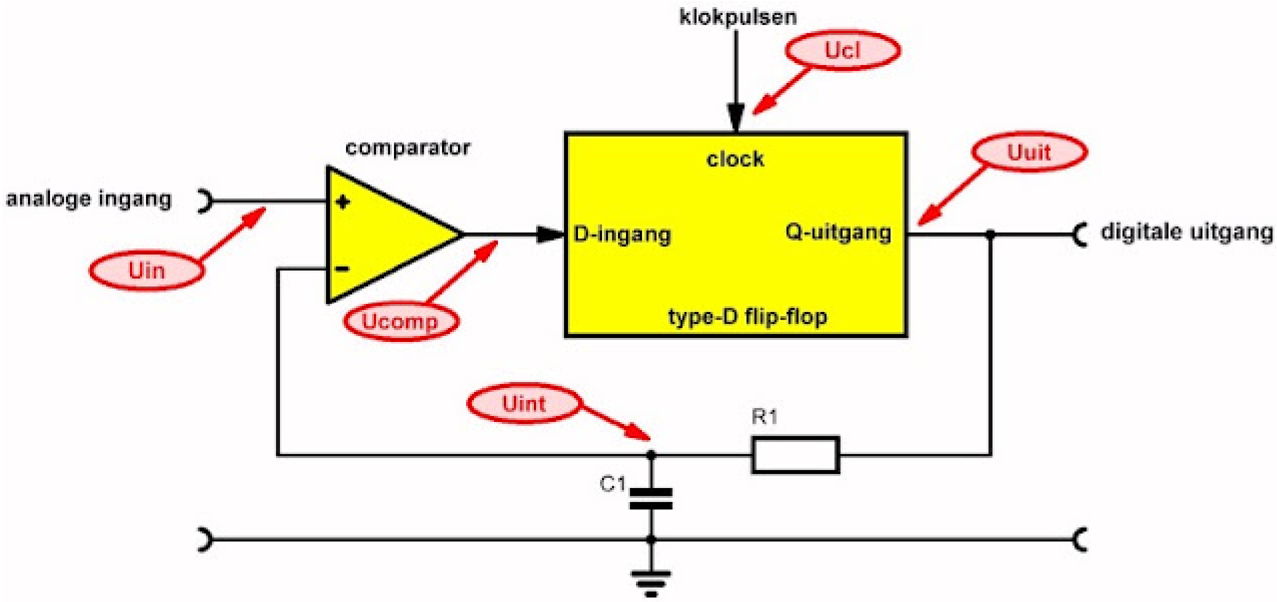
Auteur: Jos Verstraten, Landgraaf, Nederland
Email: josverstraten@live.nl
Publicatiedatum: 15-06-2018

Het principe van delta-modulatie

Een één bit brede ADC
De delta-modulator is een serieel werkende analoog naar digitaal omzetter. Een continu variërende analoge spanning wordt omgezet in een seriële pulstrein. De breedte van de pulsen is echter niet constant, maar afhankelijk van het verloop van de analoge spanning. Als deze stijgt zal de delta-modulator zijn uitgangsspanning van 'L' naar 'H' sturen. Er ontstaat dus een stijgende flank als de ingangsspanning stijgt. Als de ingangsspanning daalt zal de uitgang van de modulator van 'H' naar 'L' gaan. Een dalende ingangsspanning veroorzaakt dus een dalende flank. Als de ingangsspanning constant blijft zal het uitgangssignaal van de delta-modulator zeer snel omschakelen van 'L' naar 'H' en vice versa. Er ontstaan dan zeer smalle symmetrische pulsen, in feite dus een gewone blokgolf.

Geen sample-and-hold nodig
Een van de principiële eigenschappen van het systeem is dat de schakeling kan werken zonder sample-and-hold, waarin monsters van de te digitaliseren analoge spanning tijdelijk worden bewaard. U kunt dus een snel variërende analoge spanning aan de ingang leggen en de uitgangsspanning van de modulator zal een pulstrein opwekken waarbij de verhouding tussen de 'L'- en de 'H'-pulsen de digitale vertaling is van het variërende verloop van de ingangsspanning.
De delta-modulator heeft wél een kloksignaal nodig waarvan de frequentie de snelheid van de omzetting vastlegt.

Het principeschema van de delta-modulator
In onderstaande figuur is het basisschema van een delta-modulator voorgesteld. De schakeling is dus erg eenvoudig en bestaat uit een snelle analoge comparator, een type-D flip-flop en een passieve integrator. Deze is samengesteld uit de weerstand R1 en de condensator C1.
De analoge ingangsspanning wordt aangeboden aan de niet-inverterende ingang van de comparator. De uitgang van deze schakeling stuurt de data-ingang van de type-D flip-flop. De clock-ingang van deze schakeling wordt gestuurd met een externe puls die de snelheid van het systeem bepaalt. De uitgang van de flip-flop is de ingang van de integrator. De uitgangsspanning van deze integrator stuurt de inverterende ingang van de comparator. Er wordt dus een in zichzelf teruggekoppeld systeem gevormd.

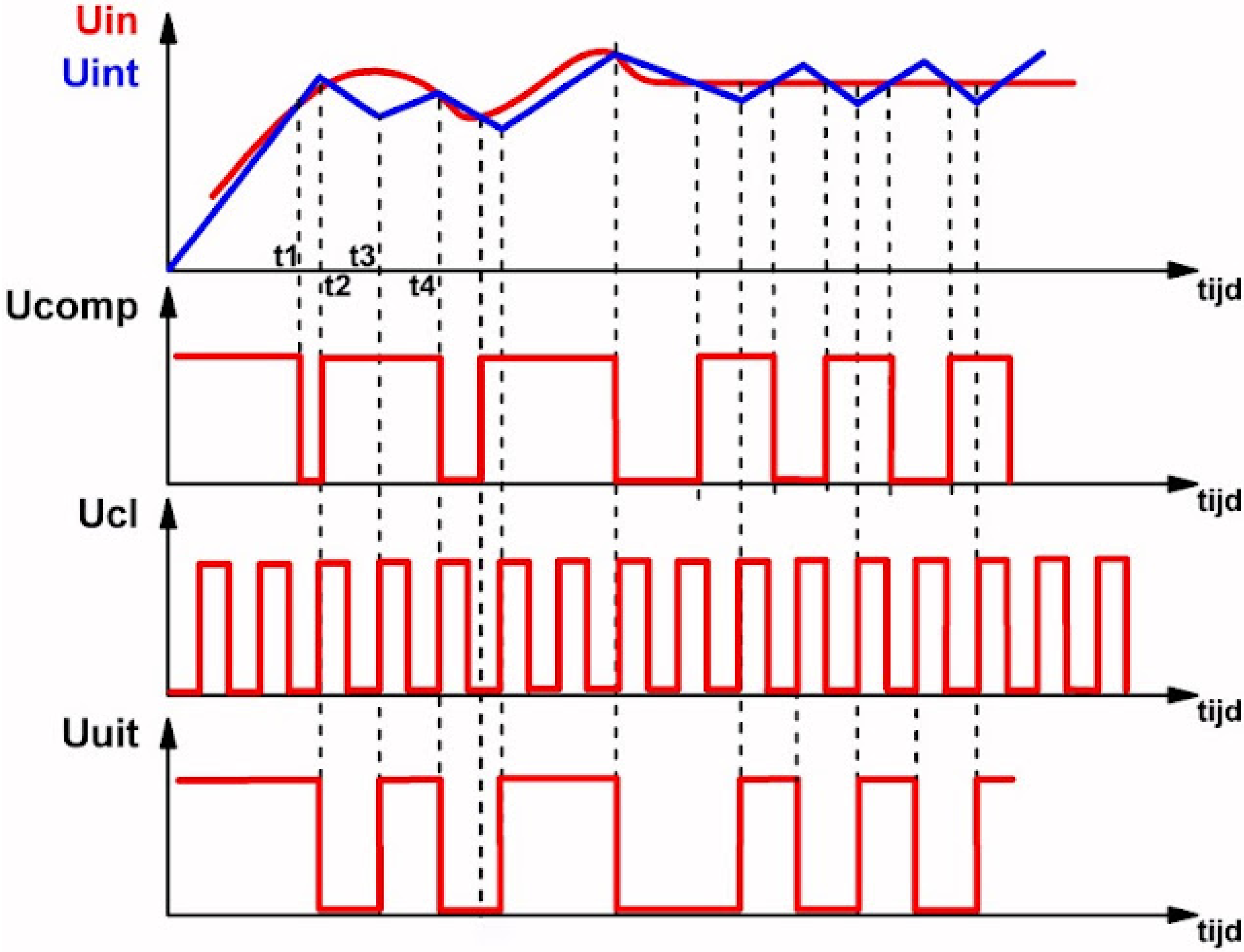


Het basisschema van een delta-modulator. (© 2018 Jos Verstraten)

De werking van een type-D flip-flop
De werking van de schakeling is volledig afhankelijk van de manier waarop een type-D flip-flop werkt. Dit type geheugencel heeft een data-ingang, D genoemd. De uitgang Q van de flip-flop neemt de logische waarde op de D over op de stijgende flank van het signaal op de clock-ingang. De flip-flop blijft in deze status, ook als de D-ingang van logisch niveau verandert. Eerst bij de volgende stijgende flank van het klok-signaal neemt de Q-uitgang deze variatie over.

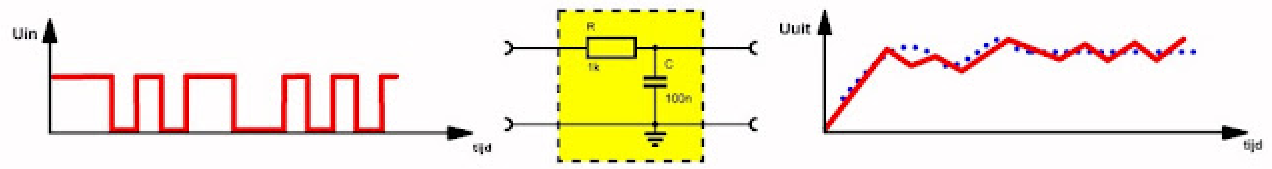
De werking van de delta-modulator grafisch toegelicht
De werking van de schakeling wordt verklaard aan de hand van de grafieken in onderstaande figuur.
Bij het inschakelen van de voedingsspanning is de spanning over de integrator-condensator C1 uiteraard gelijk aan nul. De ingangsspanning heeft op dit moment een bepaalde positieve waarde. De spanning op de niet-inverterende ingang van de comparator is dus groter dan deze op de inverterende ingang. De uitgang van de comparator wordt 'H'. Deze logische waarde verschijnt op de ingang van de flip-flop en wordt bij de eerste stijgende flank van het clock-signaal in de flip-flop geclocked. De Q-uitgang van de schakeling, tevens de uitgang U_{uit} van de delta-modulator wordt bijgevolg 'H'.
Deze hoge spanning gaat de condensator C1 via de weerstand R1 opladen. De spanning op de inverterende ingang van de comparator gaat dus langzaam stijgen. Op tijdstip t1 wordt deze spanning gelijk aan de waarde van de ingangsspanning. De comparator klapt om, de uitgang wordt gelijk aan 'L'.
Op tijdstip t2, bij de volgende actieve flank van de clock, wordt deze nieuwe waarde van D in de flip-flop opgenomen. De uitgangsspanning van de schakeling gaat dus ook naar 'L'.
Het gevolg is nu dat de integratie-condensator via de weerstand R1 gaat ontladen naar het massapotentiaal op de uitgang van de schakeling. De spanning op de inverterende ingang van de integrator daalt dus, met als gevolg dat deze schakeling onmiddellijk omklapt omdat de ingangsspanning nog steeds stijgende is en de spanning op de niet-inverterende ingang groter is dan de spanning op de inverterende ingang. D wordt weer 'H'.
Bij de volgende actieve flank van de clock (tijdstip t3) wordt deze waarde weer in de flip-flop ingelezen. De uitgangsspanning van de schakeling U_{uit} wordt weer 'H'. De condensator gaat opladen, de spanning op de inverterende ingang van de comparator gaat stijgen.
Op deze manier zorgt de teruggekoppelde schakeling ervoor dat de spanning op de inverterende ingang van de comparator een zo goed mogelijke benadering wordt van de ingangsspanning.
Als de ingangsspanning constant blijft (rechter gedeelte van de grafieken) zal de flip-flop op het ritme van het clock-signaal steeds omklappen en zal de spanning op de inverterende ingang van de comparator driehoekvormig schommelen rond de constante waarde van de ingangsspanning.

Aan deze laatste eigenschap dankt de schakeling haar naam. De Griekse letter ∆ (delta) heeft immers een driehoekvorm!



De werking van de delta-modulator grafisch toegelicht. (© 2018 Jos Verstraten)

Het demoduleren van een delta-gemoduleerd signaal
Bij het verwerken van het delta-gemoduleerd signaal moet u dit weer omzetten in een analoge spanning. Uit het principe van de delta-modulator volgt in feite reeds hoe u dat kunt doen. De integrator R1-C1 zet de uitgangsspanning van de delta-modulator om in een analoge spanning die de ingangsspanning zo goed mogelijk benadert. Het volstaat dus de gemoduleerde spanning door een identieke integrator te sturen om de spanning na te bootsen die verschijnt op de inverterende ingang van de comparator in de modulator. Het zal duidelijk zijn dat deze eenvoudige terugwinning van een delta-gemoduleerd signaal niet in geringe mate bijdraagt aan de eenvoud van het systeem.

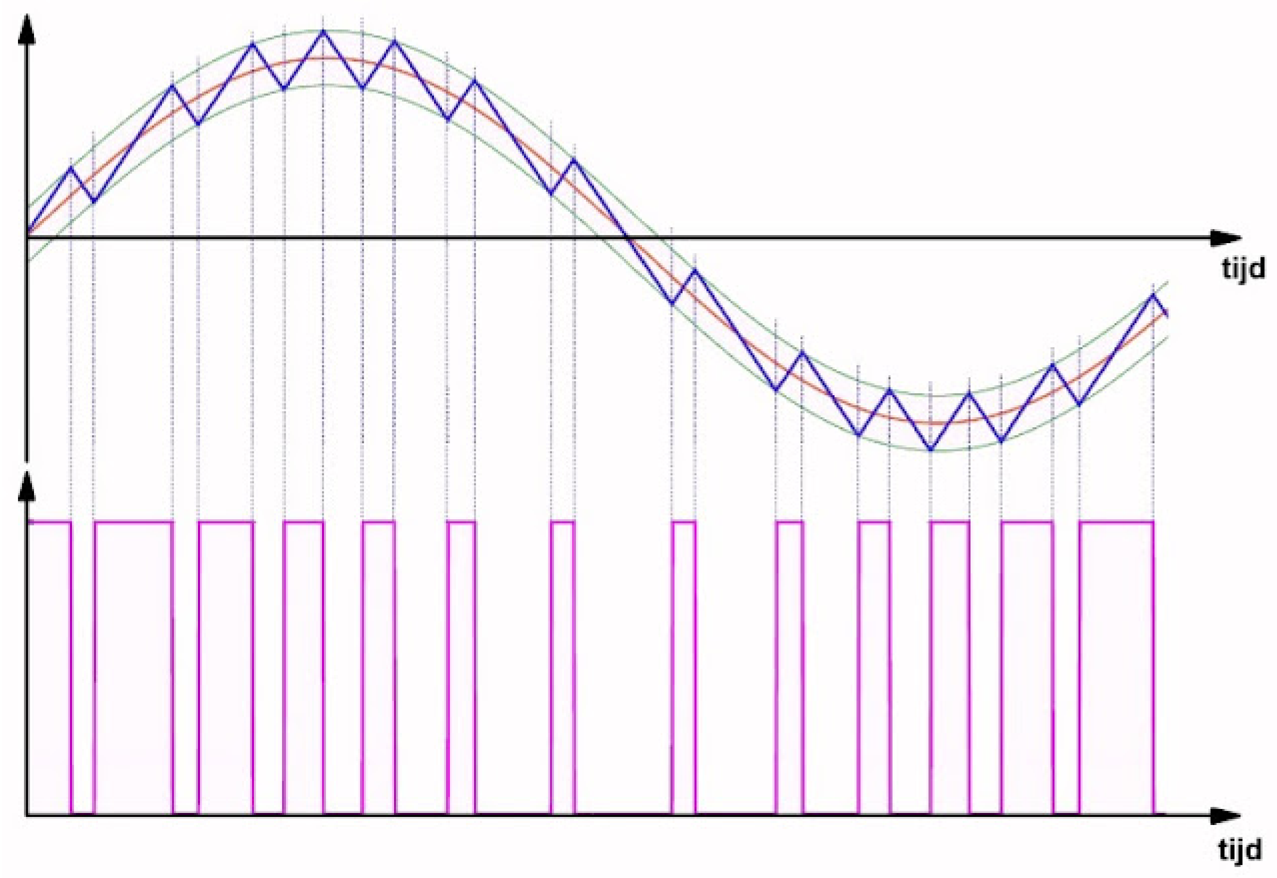


Het herwinnen van het originele signaal. (© 2018 Jos Verstraten)

Eigenschappen van delta-modulatoren

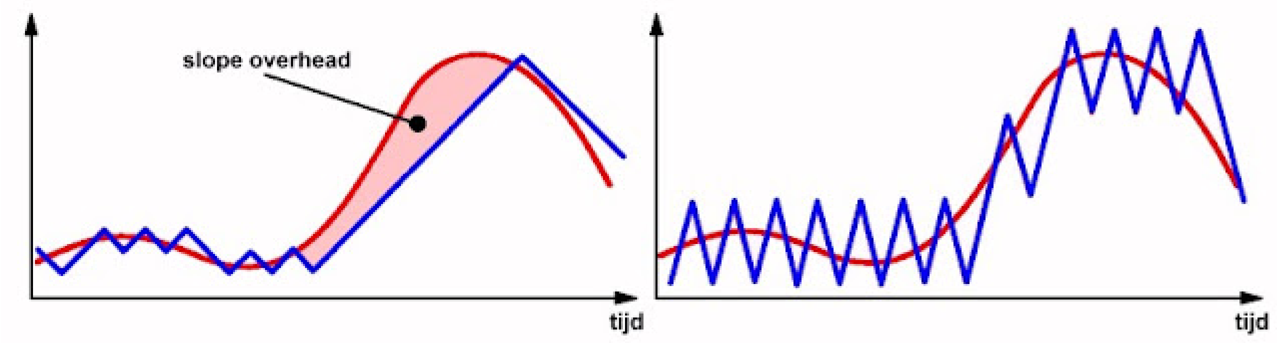
Granulaire ruis
Zoals ieder ADC/DAC-systeem heeft ook de delta-modulator last van quantiseringsruis. Het herwonnen uitgangssignaal is slechts een benadering van het analoog signaal. Heet die quantiseringsruis bij de meeste soorten omzetters *'de trapvormige benadering van de ingangsspanning'*, bij de delta-modulator spreekt men van de *'granulaire ruis'*. Dat

verschijnsel wordt duidelijk als u onderstaande figuur bekijkt, waar één periode van een sinusvormig signaal door een delta-modulator/demodulator is gevoerd. Het rode signaal geeft de ene periode van het analoog signaal weer. Het paarse signaal geeft de digitale code aan de uitgang van de delta-modulator. Het blauwe signaal is het herwonnen analoog signaal dat uit de integrator komt. U ziet hier duidelijk hoe de granulaire ruis op dit signaal er uitziet. De twee groene lijnen geven de top-tot-top waarde van deze granulaire ruis weer.



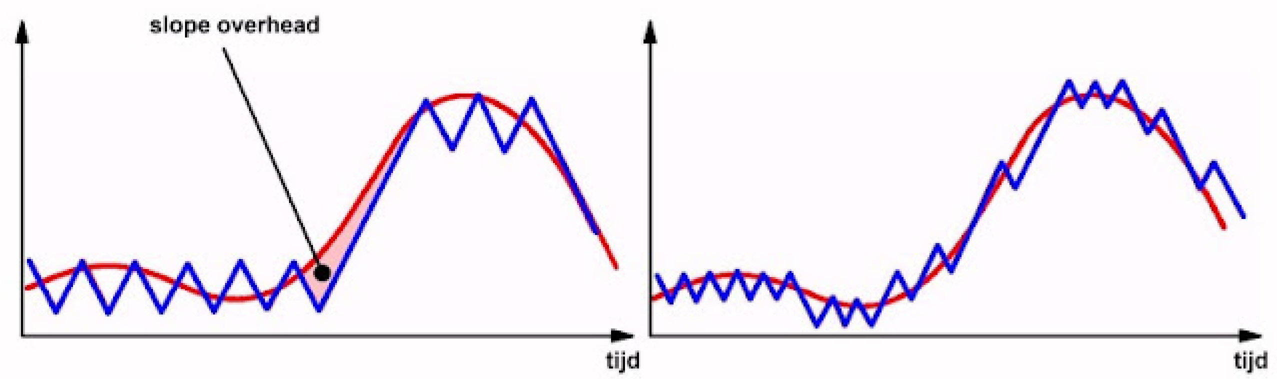
De granulaire ruis op de uitgang van een delta-modulator/demodulator. (© Wikimedia Commons & Jos Verstraten)

De slope setting en de slope overhead
De tijdconstante die u aan de integrator toekent is een belangrijke grootheid bij het ontwerpen van delta-modulatoren. Deze grootheid wordt hier de *'slope setting'* genoemd. De waarde van de slope setting bepaalt in grote mate de nauwkeurigheid waarmee het analoog signaal wordt herwonnen. Dit wordt verduidelijkt aan de hand van de onderstaande figuur.
Rechts is een systeem getekend waarbij aan de integrator een kleine slope setting is toegekend. Het herwonnen signaal volgt het origineel signaal vrij nauwkeurig, maar u hebt last van een tamelijk grote granulaire ruis. Links is een systeem getekend met een grote slope setting. De granulaire ruis is aanzienlijk kleiner, maar het systeem is niet in staat snelle veranderingen van het analoog signaal te volgen. Bij dergelijke snelle overgangen loopt het herwonnen signaal achter op het origineel signaal. Dit verschijnsel wordt de *'slope overhead'* genoemd. Het zal duidelijk zijn dat u, bij het ontwerpen van een delta-modulator, een aanvaardbaar compromis moet zoeken tussen lage granulaire ruis en kleine slope overhead.



De invloed van de slope setting op de kwaliteit van het herwonnen signaal. (© 2018 Jos Verstraten)

De invloed van de klokfrequentie
Ook de frequentie van het kloksignaal heeft een grote invloed op de kwaliteit van het herwonnen signaal. Dit wordt toegelicht aan de hand van de onderstaande figuur. Links is een delta-modulator voorgesteld met een lage klokfrequentie. Zoals u waarschijnlijk wel verwacht, heeft zo'n systeem last van een grote slope overhead. Als u de klokfrequentie verhoogt volgt het herwonnen signaal het origineel signaal veel nauwkeuriger, maar dan moet u wél de slope setting verlagen.
Een hoge klokfrequentie en een lage slope setting minimaliseren bovendien de granulaire ruis op het uitgangssignaal.



De invloed van de klokfrequentie op de kwaliteit van het herwonnen signaal. (© 2018 Jos Verstraten)